

УДК 621.43.013

*Е.П. Воронаев, инж.*

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

### Введение

Применение трехмерных газодинамических моделей в проектировании поршневых ДВС позволяет существенно улучшить характеристики газозвдушного тракта (ГВТ). В качестве примера, в настоящей публикации приведен расчет рабочего цикла авиационного поршневого двигателя с различными параметрами впускной и выпускной систем.

Двигатель – 4-х тактный, 4-х цилиндровый, с принудительным зажиганием, выполнен по оппозитной схеме. Система охлаждения – жидкостная. Рабочий объем двигателя – 1649 см<sup>3</sup>, диаметр цилиндра – 92 мм, ход поршня – 62 мм. Система питания – распределенный впрыск. Механизм газораспределения – штанговый, с общим распределительным валом в картере. Количество клапанов на цилиндр – 2. Степень сжатия – 10,0.

Фазы газораспределения составляют 19 и 67 град п.к.в. для впуска, 56 и 26 град. п.к.в. для выпуска.

Доводка элементов двигателя выполнялась в рамках опытно-конструкторской работы (ОКР) «Розробка елементів конструкції чотиритактного поршневого двигуна рідинного охолодження» (Договор Минпромполитики № 5-1697/07). Основания для выполнения ОКР: «Комплексна державна програма розвитку авіаційної промисловості України до 2010 року» от 26.08.2008; Письмо Минпромполитики № 01/5-1-60 от 12.08.2008.

Согласно Техническому заданию, двигатель предназначен для установки на вертолете украинской разработки КТ-112 «Кадет».

### Анализ последних достижений и публикаций

Для построения оптимальной геометрии газозвдушного тракта можно руководствоваться рекомендациями работы [1]. Автором проведены экспериментально-расчетные исследования различных впускных и выпускных систем для многоцилиндровых двигателей и выведены эмпирические зависимости, дающие хорошую сходимост. Однако проектируемый двигатель существенно отличается как размерностю, так и скоростными режимами. К тому же, применение этих рекомендаций к разветвленным

коллекторам с общими участками и полостями вызывает дополнительные трудности. Еще один существенный момент – в [1] использовано условие резонанса, впервые полученное О. Лутцем, которое предполагает мгновенное открытие и закрытие органов газораспределения в НМТ и ВМТ. В проектируемом же двигателе фазы газораспределения приняты довольно широкими, и это необходимо учесть в расчете.

В работе [2] течения на прямолинейных участках рассматриваются как нестационарные одномерные, а для моделирования течений в разветвлениях предложен метод, основанный на численном решении задачи о распаде произвольного разрыва. Этим методом можно, в принципе, решить задачу совмещения и разделения течений, но здесь каждый такой случай требует отдельного рассмотрения и все равно – принятия некоторых коэффициентов и соглашений о соотношениях давлений и скоростей. Переменное же сечение отдельного трубопровода по этой методике учесть очень сложно.

Известна работа В.Г. Дьяченко [3]. Разработанная им методика позволяет уже вести расчет и в каналах переменного сечения, но постановка граничных условий у переменного сечения клапанов по-прежнему представляет значительные трудности. К тому же этот метод относительно громоздок как для создания расчетной программы, так и для расчета. Также, ни эта, и ни одна из предыдущих методик не моделируют нестационарный процесс в цилиндре совместно с газодинамическими процессами в коллекторах, а это существенное препятствие (как будет показано далее) к моделированию рабочего цикла двигателей с продолжительным перекрытием фаз газораспределения и тем самым – использованию дополнительных резервов в оптимизации.

В публикации [4] предложена модель трехмерного вязкого турбулентного течения газовой смеси в щели впускного клапана ДВС. Потенциальные возможности данной модели позволяют уже решать практически любые расчетные задачи в коллекторах любой формы и конфигурации. Однако, насколько можно судить из работы, авторы больше останавли-

ваются на тщательном моделировании отдельных элементов ГВТ и не рассматривают всю систему впуска или выпуска в целом.

В настоящей публикации предложена и используется трехмерная газодинамическая модель ДВС. Отличительной ее особенностью является то, что она изначально разрабатывалась для моделирования и оптимизации всего ГВТ произвольной конфигурации, включая все цилиндры [5, 6, 7]. Данная особенность модели важна при проектировании многоцилиндровых двигателей, в которых процессы в цилиндрах влияют друг на друга через объединенные участки впускной и (или) выпускной систем.

Программная реализация данной модели позволяет в течение 3 - 4 суток по специальной методике сформировать геометрию ГВТ практически любой формы и конфигурации. Мощность расчетной сетки, при этом, может достигать до 3-х млн. ячеек.

Применение трехмерной модели позволило также, с высокой точностью реализовывать диаграммы изменения проходного сечения клапанов в соответствии изменяющейся геометрии расчетной сетки. Это важно при проектировании и доводке механизма газораспределения.

#### Постановка задачи

В разрабатываемом двигателе, согласно Техническому заданию, требуется обеспечение двух основных режимов: 1) взлетный – 86,1 кВт при частоте вращения коленчатого вала (КВ)  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ , 2) максимальный продолжительный – 81 кВт при  $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$ . Эту мощность двигателя следует считать минимально необходимой. Получение взлетной мощности до 100 кВт положительно скажется на летно-технических характеристиках вертолета. Ограничениями в этом случае являются вес и ресурс двигателя.

На этом вертолете максимальная частота вращения КВ  $5800 \text{ мин}^{-1}$  продиктована характеристиками трансмиссии и несущего винта, однако проектируемый двигатель планируется устанавливать и на других летательных аппаратах, где возможно будет его использование и на более высоких частотах вращения, обеспечивающих большую мощность. Основанием для этого является короткий ход поршня, который допускает номинальную частоту вращения КВ большую, чем  $5800 \text{ мин}^{-1}$ .

По изложенным выше соображениям выбраны три расчетных режима:  $n = 5500, 5800 \text{ и } 6500 \text{ мин}^{-1}$ .

На этих режимах, с целью получения наибольшей мощности, требуется выбрать наиболее рациональную геометрию ГВТ.

Условия компоновки силовой установки на вертолете (в отличие от самолета) позволяют выполнить трубопроводы выпускной системы более протяженными, что и было использовано.

#### Результаты расчета

В процессе проектирования силовой установки были рассчитаны характеристики двигателя, оснащенного различными (пробными) вариантами ГВТ. В настоящей публикации рассмотрены два варианта – исходный и улучшенный. Их параметры приведены в табл. 1.

Впускной коллектор с ресивером представлен на рис. 1. Варианты впускного коллектора, кроме размеров, принципиально ничем не отличаются.

На основе анализа известных схем выпускных систем и пробных расчетов было принято решение применить выпускную систему с преобразователем импульсов. Исходный и улучшенный варианты выпускной системы представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

Результаты моделирования приведены в табл. 2, а диаграммы процессов газообмена – на рис. 4 – рис. 9.

В табл. 1 и на диаграммах применены следующие обозначения:  $N_e$  – эффективная мощность,  $G_{s.выбр}$  – количество смеси, выброшенной обратно из цилиндра в конце впуска,  $G_{s.забр}$  – количество отработавших газов, заброшенных во впускной коллектор в начале открытия впускного клапана,  $G_{г.возвр}$  – количество отработавших газов, вернувшихся обратно в цилиндр перед закрытием выпускного клапана,  $P$  – давление в цилиндре,  $P_{вп}$  и  $P_{вып}$  – средние давления в сечениях перед впускным клапаном и за выпускным клапаном,  $P_{гл}$  и  $P_{вф}$  – средние давления в сечениях перед глушителем и за воздушным фильтром.  $P_i, P_{нх}$  – среднее индикаторное давление и среднее давление насосных ходов.

Из сравнения показателей двигателя с исходным и улучшенным ГВТ следует, что на заданных режимах ( $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$  и  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ ) мощность возросла на 13 % и 16 % соответственно. На режиме с  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$  – на 12 %. С практической точки зрения – это существенный прирост мощности.

Таблица 1. Параметры газозовоздушного тракта.

	Варианты ГВТ	
	Исход- ный	Улуч- шенный
Объем впускного ресивера, см <sup>3</sup>	874	1092
Диаметр впускного трубопровода, мм	42,1	40,5
Длина впускного трубопровода, мм	180	350
Диаметр подводящих выпускных трубопроводов, мм	35,4	36,0
Длина подводящих выпускных трубопроводов, мм	480	700
Диаметр объединенного выпускного трубопровода, мм	–	66,7
Длина объединенного выпускного трубопровода, мм	–	400
Объем первичной камеры глушителя, см <sup>3</sup>	1205	2070
Эквивалентный диаметр выходного поперечного сечения из первичной камеры глушителя, мм	44,9	62,2

Из данных табл. 2 следует, что для обоих вариантов газозовоздушного тракта на всех рассматриваемых режимах коэффициент наполнения имеет довольно высокие значения. Это объясняется низким значением параметра « $S/D$ », и как следствие – высокими, по отношению к ходу поршня, диаметрами клапанов. Проявляет себя и эффект инерционного наддува.

Рассматривая и сопоставляя диаграммы газообмена, можно отметить, что наибольшее влияние на характеристики двигателя оказывает изменение длин подводящих и объединенного трубопровода выпускной системы. Это отчетливо видно как по моменту возвращения к клапанам волны сжатия, так и по степени разрежения возле клапанов. На взлетном режиме (см. рис. 6 и рис. 7) у улучшенного варианта ГВТ у выпускных клапанов достигается разрежение менее 0,04 МПа на угле поворота коленчатого вала (п.к.в.) равном 520 град., в то время когда у исходного варианта – только 0,06 МПа и на угле 460 град. Далее следует: у исходного варианта – интенсивный скачок давления – до 0,13 МПа – от вернувшейся волны сжатия, а у улучшенного варианта всего лишь – до 0,07 МПа. Все это происходит в период пере-

крытия фаз газораспределения и сказывается как на очистке камеры сгорания от отработавших газов, так и на дополнительном перепаде давлений (помимо движения поршня), способствующем разгону воздушного заряда во впускной системе.

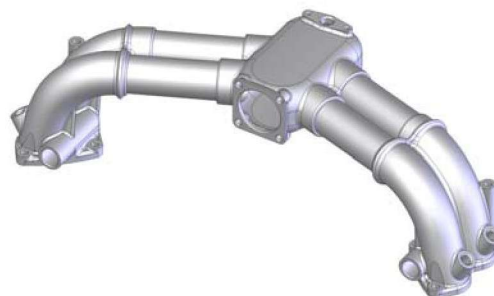


Рис. 1. Впускной коллектор

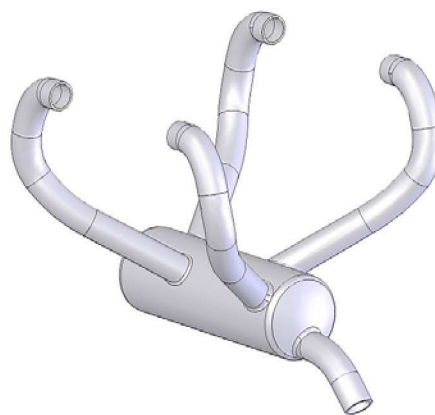


Рис. 2. Исходный вариант выпускной системы

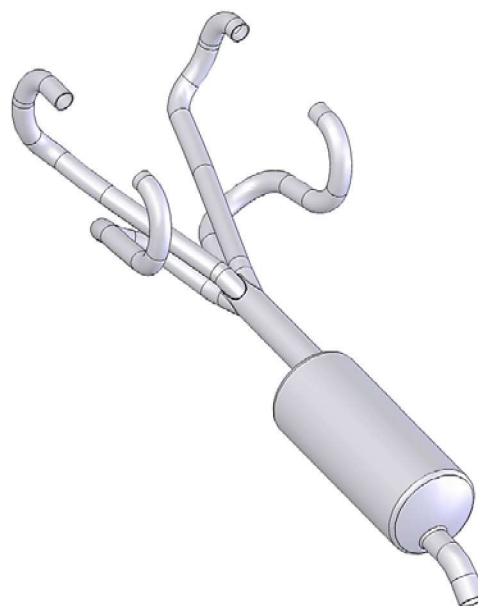


Рис. 3. Улучшенный вариант выпускной системы

Таблица 2. Результаты моделирования

$n, \text{мин}^{-1}$	5500	5800	6500
Исходный газозвдушный тракт			
$N_e, \text{кВт}$	77,2	81,3	89
$\eta_v$	0,967	0,976	0,98
$\gamma$	0,046	0,049	0,047
$G_{s.\text{выбр}}, \%$	4,33	4,13	2,91
$G_{s.\text{забр}}, \%$	0,11	0,7	0,13
$G_{г.\text{возвр}}, \%$	0,01	0,06	0,08
$g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$	267,2	269,9	275,7
$P_i, \text{МПа}$	1,209	1,221	1,229
$P_{\text{нх}}, \text{МПа}$	-0,044	-0,051	-0,062
$(P_i + P_{\text{нх}}), \text{МПа}$	1,165	1,170	1,167
Улучшенный газозвдушный тракт			
$N_e, \text{кВт}$	87,2	94,3	100
$\eta_v$	1,073	1,12	1,11
$\gamma$	0,031	0,028	0,027
$G_{s.\text{выбр}}, \%$	4,19	3,46	1,22
$G_{s.\text{забр}}, \%$	0,03	0,02	0,01
$G_{г.\text{возвр}}, \%$	0,05	0,06	0,03
$g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$	262,4	265,2	278,3
$P_i, \text{МПа}$	1,342	1,394	1,390
$P_{\text{нх}}, \text{МПа}$	-0,044	-0,060	-0,101
$(P_i + P_{\text{нх}}), \text{МПа}$	1,298	1,334	1,289
Сравнительные изменения параметров			
$\Delta N_e, \%$	+13,1	+16,0	+12,4
$\Delta \eta_v, \%$	+11,0	+14,8	+13,3
$\Delta(P_i + P_{\text{нх}}), \%$	+11,4	+14,0	+10,5

Подтверждением этого является то, что коэффициент остаточных газов у исходного варианта ГВТ составляет 0,049, а у улучшенного – 0,028 (см. табл. 2).

На диаграмме рис. 7, видно, что за пришедшей к выпускному клапану волной сжатия следует еще 60-градусный участок вновь понижающегося давления. Этот участок объясняется наличием у улучшенной выпускной системы объединенного трубопровода. В итоге – первый скачок давления (незначительный) – это момент достижения прямой волны сжатия объединенного трубопровода, а второй скачок давления (значительный и основной) – это момент, когда прямая волна сжатия уже достигла глушителя. Исходный вариант выпускной системы не имеет объеди-

ненного трубопровода, и как следствие – интенсивная обратная волна сжатия приходит к клапанам еще до закрытия выпускного клапана и существенно снижает качество газообмена.

По приведенному в табл. 2 параметру  $G_{s.\text{забр}}$ , можно также сделать вывод о том, что преждевременно пришедшая к клапанам волна сжатия снижает качество газообмена. При частоте вращения КВ  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$  заброс отработавших газов во впускной патрубок в момент открытия клапана у исходного варианта составляет 0,13 % от общей массы заряда, а у улучшенного варианта – всего 0,01 %.

На режиме с  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$  волна разрежения у выпускного клапана реализуется наиболее полно – разрежение возле клапанов в период перекрытия максимально, а пришедшая обратная волна сжатия уже не вызывает ответного скачка давления в цилиндре.

Из диаграмм газообмена видно, что впускная система также настроена – на режиме с  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$  перед закрытием клапана повышение давления во впускном патрубке достигает 0,14 МПа, а на режиме с  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$  – почти 0,16 МПа. Это обстоятельство способствует получению коэффициентов наполнения, превышающих единицу.

В табл. 2 приведены сравнительные изменения параметров, из которых следует, что относительное изменение мощности  $N_e$  и алгебраической суммы  $(P_i + P_{\text{нх}})$  отличаются от относительных изменений коэффициента наполнения  $\eta_v$ . Это объясняется тем, что потери на трение и привод вспомогательных механизмов, которые, оставаясь постоянными для обоих вариантов, изменяют соотношение между полезной работой и потерями. Изменение суммы  $(P_i + P_{\text{нх}})$  на частоте вращения КВ  $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$  практически совпадает с изменением коэффициента наполнения. На режимах, с  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$  и  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$  прирост  $(P_i + P_{\text{нх}})$  отстает от прироста коэффициента наполнения  $\eta_v$  по причине сравнительного роста у улучшенного варианта давления насосных ходов  $P_{\text{нх}}$ .

#### Заключение

Применение трехмерной газодинамической модели в формировании рациональной конфигурации газозвдушного тракта поршневого ДВС позволило уже на стадии проектирования существенно повысить его мощность. На требуемых режимах, с  $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$  и  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ , мощность возросла на 13 % и 16 % соответственно. На взлетном режиме с  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$  – достигнуты коэффициент наполне-

ния и остаточных газов 1,12 и 0,028 соответственно, против 0,976 и 0,049 у исходного варианта газозвдушного тракта.

В дальнейших исследованиях планируется проведение многофакторной оптимизации конструктивных параметров систем впуска и выпуска.

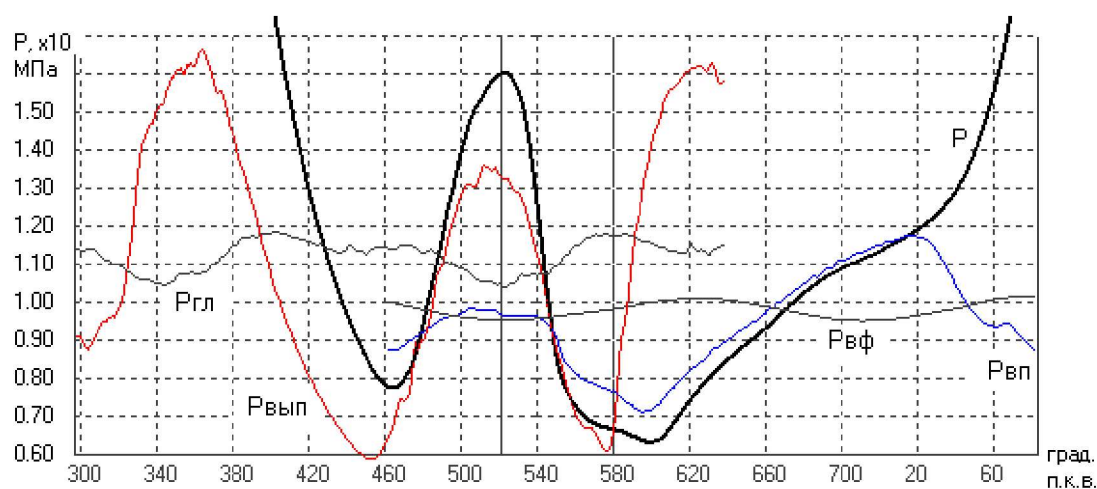


Рис.4. Диаграмма газообмена,  $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$ , исходный вариант газозвдушного тракта

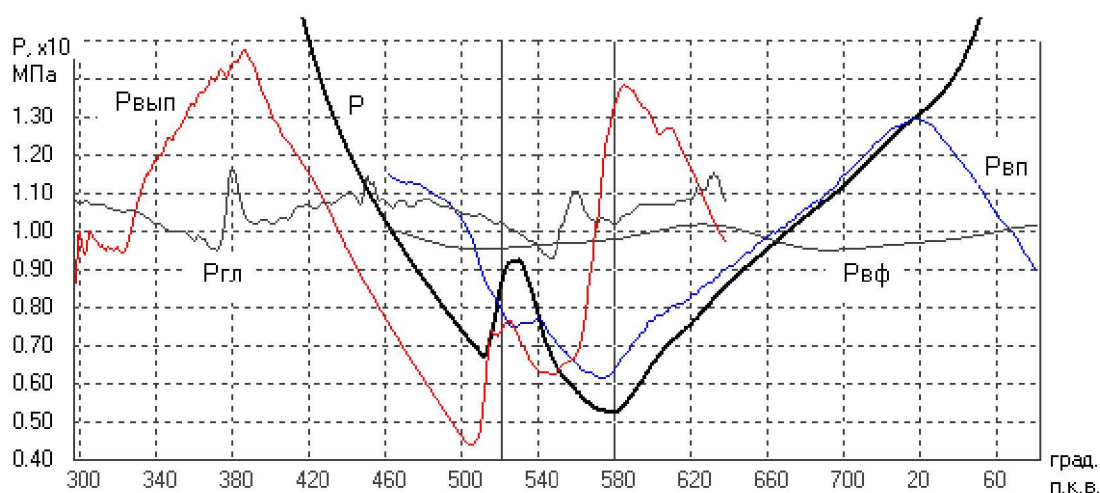


Рис.5. Диаграмма газообмена,  $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$ , улучшенный газозвдушный тракт

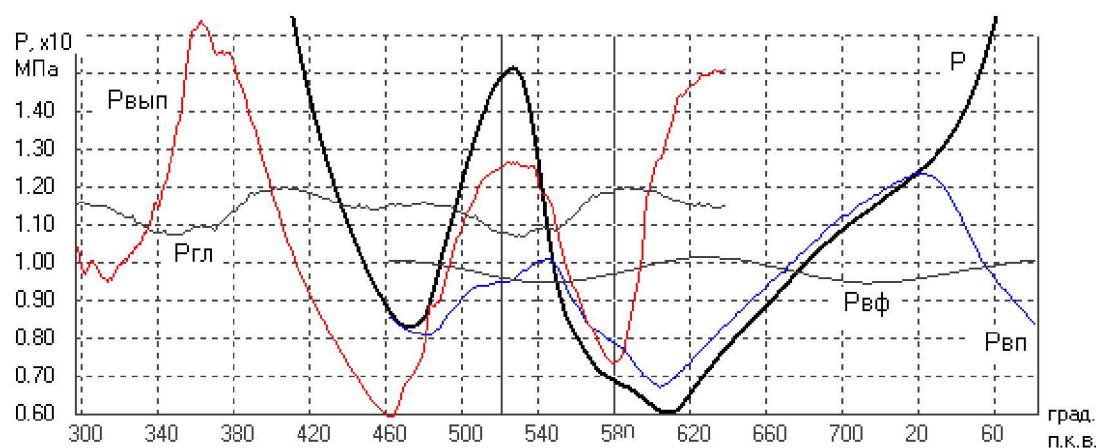
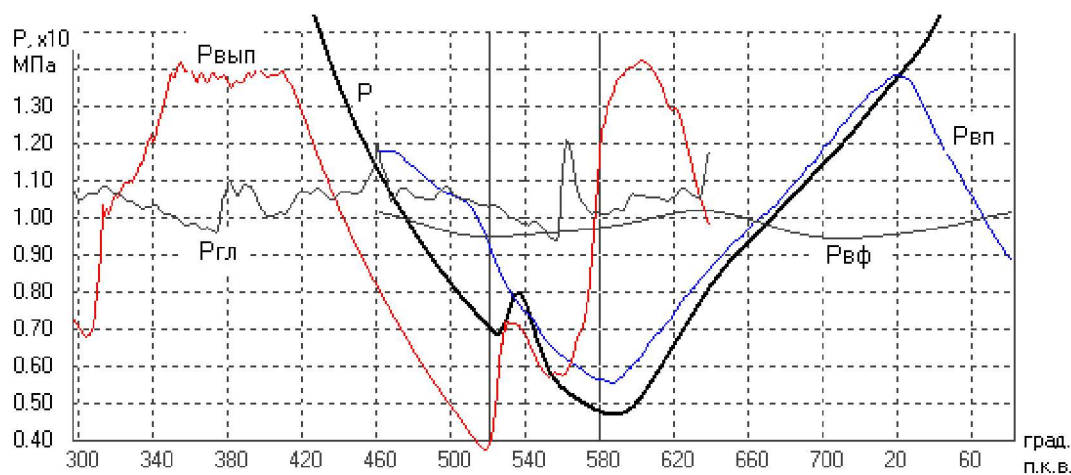
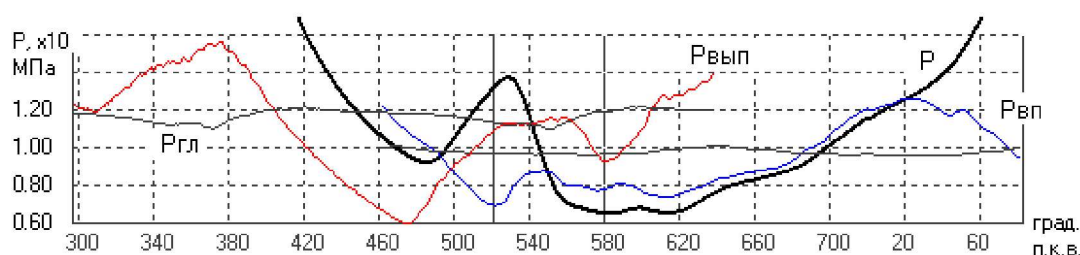
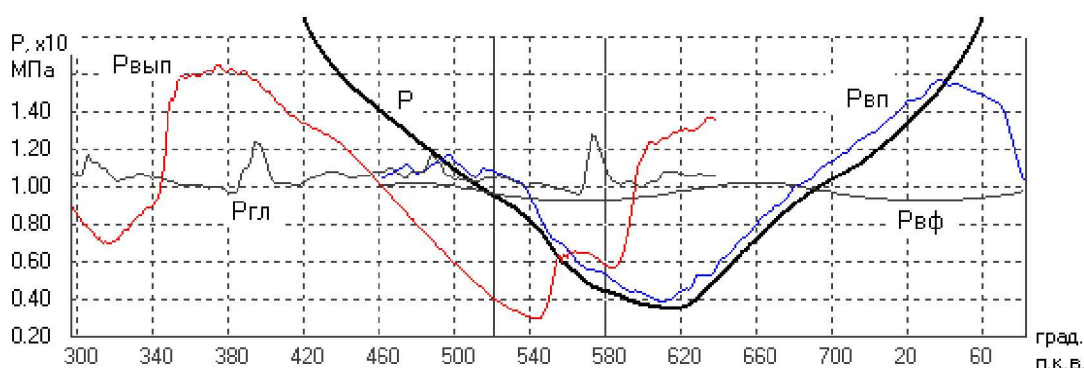


Рис.6. Диаграмма газообмена,  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ , исходный вариант газозвдушного тракта



Рис. 7. Диаграмма газообмена,  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ , улучшенный газовоздушный трактРис. 8. Диаграмма газообмена,  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$ , исходный вариант газовоздушного трактаРис. 9. Диаграмма газообмена,  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$ , улучшенный газовоздушный тракт**Список литературы:**

1. Данилов В.В. О выборе оптимальной геометрии газозавоздушных трактов четырехтактных дизелей с акустическим наддувом / В.В. Данилов // Двигатели внутреннего сгорания. – 1973. – № 17. – С. 77-88.
2. Гусев А.В. Нестационарное течение газа в разветвлениях газозавоздушного тракта / А.В. Гусев, М.Г. Круглов, С.В. Павлов // Двигатели внутреннего сгорания. – 1985. – № 42. – С. 3-9.
3. Дьяченко В.Г. Газообмен в двигателях внутреннего сгорания: Учебное пособие / В.Г. Дьяченко. – К.: УМК ВО, 1989. – 204 с.
4. Солодов В.Г. Численная модель течения вблизи впускного клапана ДВС / В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев, А.А. Хандримайлов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 2. – С. 81-84.
5. Белоцерковский О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. литературы, 1982. – 392 с.
6. Воропаев Е.П. Трехмерная газодинамическая модель четырехтактного четырехцилиндрового поршневого ДВС / Е.П. Воропаев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 2. – С. 54-59.
7. Воропаев Е.П. Моделирование внешней скоростной характеристики двигателя спортбайка SUZUKI GSX-R750 / Е.П. Воропаев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 1. – С. 47-52.